

ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ БАЛДЖАМИ

© 2015 г. В. П. Решетников^{1*}, С. С. Савченко¹,
А. В. Мосенков^{1,2,3}, Н. Я. Сотникова¹, Д. В. Бизяев^{4,5}

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Университет Гента, Бельгия

³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург

⁴Обсерватория Апачи-Пойнт и Университет штата Нью-Мексико, США

⁵Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 06.07.2015 г.

На основе данных обзора SDSS составлена выборка из девяти видимых с ребра спиральных галактик с балджами, большие оси которых демонстрируют сильный наклон к плоскости диска. Такие объекты называются галактиками с полярными балджами. По своей морфологии они похожи на галактики с полярными кольцами, однако центральные объекты в них имеют небольшие размеры и светимости. В полосах g и r выполнен фотометрический анализ галактик, определены основные характеристики их балджей и дисков. Показано, что диски таких галактик типичны для дисков спиральных галактик поздних морфологических типов, интегральные характеристики балджей сходны с параметрами обычных балджей. Звездные диски галактик с полярными балджами часто демонстрируют крупномасштабные изгибы плоскостей, что может быть объяснено взаимодействием с соседними галактиками или внешней аккрецией.

Ключевые слова: галактики, балджи, взаимодействующие галактики, морфология.

DOI: 10.7868/S0320010815120116

ВВЕДЕНИЕ

Балдж является одной из основных подсистем спиральных галактик. От других подсистем (дисков, баров, спиральных ветвей и пр.) балджи отличаются законом распределения яркости, формой, доминирующим звездным населением, характером движения звезд и другими характеристиками. В течение длительного времени балджи рассматривались как своего рода маленькие эллиптические галактики, окруженные звездным диском. В последние пару десятилетий такая упрощенная картина стала меняться на более сложную. Как оказалось, балджи не представляют собой однородный тип объектов, а распадаются по крайней мере на две разные группы — классические балджи, во многом похожие на эллиптические галактики (см., например, Рензини, 1999), и псевдобалджи, которые по ряду характеристик ближе к дисковым галактикам (Корменди, Кенникатт, 2004; Корменди, 2015). Атанасула (2005) предложила ввести и третий отдельный тип балджей — *boxu/peanut* балджи, которые представляют собой бар, видимый в проекции

“с ребра”. Ситуация запутывается еще и тем, что в одной и той же галактике разные типы балджей могут сосуществовать (см., например, Эрвин и др., 2015).

В этой работе мы рассматриваем еще один тип балджей — балджи, видимая большая ось которых сильно наклонена к большой оси диска галактики. Объекты с такими балджами по своей морфологии похожи на галактики с полярными кольцами (ГПК), у которых полярный компонент доминирует по светимости. Корсини и др. (2012) назвали такие балджи *полярными*. Полярные балджи исключительно редки. В недавнем обзоре, посвященном форме галактических балджей, Мендес-Абрю (2015) упоминает лишь три такие галактики: NGC 4698 (Бертола и др., 1999; Корсини и др., 2012), NGC 4672 (Сарци и др., 2000) и UGC 10043 (Метьюз, де Гриз, 2004). Основной причиной малого числа известных полярных балджей, по-видимому, является то, что выделить их можно лишь в случае, когда диск галактики близок к ориентации “с ребра” к лучу зрения, и поэтому наклон балджа к его плоскости можно легко обна-

* Электронный адрес: v.reshetnikov@spbu.ru

ружить. Если это не так, то балдж выглядит как бар и не привлекает внимания исследователей.

Ввиду малого числа известных объектов, систематика свойств и происхождение полярных балджей остаются загадками. Известно, что в двух галактиках из трех (в NGC 4698 и NGC 4672) морфологически выделенные балджи сочетаются с кинематически выделенными подсистемами в их ядрах, вращающимися почти ортогонально дискам галактик (Бертола и др., 1999; Сарци и др., 2000). В UGC 10043 кинематически выделенное ядро не обнаружено (Метьюз, де Гриз, 2004), хотя, как отмечают авторы, этому могло помешать ограниченное пространственное разрешение использованных ими спектров, а также мощная полоса поглощения, закрывающая ядро.

Существование кинематически и морфологически выделенных структур в галактиках обычно связывают со “вторичным” событием в их истории. Для объяснения формирования полярных балджей Метьюз и де Гриз (2004) рассмотрели три возможных “вторичных” события: захват диска существовавшим ранее “голым” балджем (этот сценарий похож на формирование галактик с полярными кольцами при внешней аккреции — Решетников и Сотникова, 1997); захват балджа, то есть небольшой эллиптической галактики, спиральной галактикой (этот механизм похож на формирование столкновительных колец, однако относительная скорость галактик должна быть невелика — Эпплтон и Страк-Марсел, 1996); слияние двух дисковых галактик (Бекки, 1998). На качественном уровне все эти сценарии способны описать ряд особенностей галактик с полярными балджами, однако для выбора между ними необходимо иметь обширные наблюдательные данные. В первую очередь, необходимо существенно увеличить число известных объектов этого типа, а также выполнить их детальное наблюдательное изучение и моделирование.

В нашей работе мы представляем список (небольшую выборку) новых кандидатов в галактики с полярными балджами и приводим результаты их фотометрического анализа. Все числовые величины в статье приведены для космологической модели с постоянной Хаббла $70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ и $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$.

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК С ПОЛЯРНЫМИ БАЛДЖАМИ И ИХ АНАЛИЗ

Выборка галактик

Для поиска галактик с морфологически выделенными балджами авторами были просмотрены изображения галактик из каталога EGIS (Edge-on Galaxies In SDSS — Бизяев и др., 2014), включающего почти 6 тыс. видимых с ребра галактик. В ходе

просмотра было обнаружено более двух десятков объектов, у которых по визуальному впечатлению балдж выглядел вытянутым вдоль малой оси галактики. На следующем этапе изображения всех отобранных галактик были подвергнуты фотометрической декомпозиции, в ходе которой были оценены параметры дисков и балджей, в том числе их видимые сжатия и позиционные углы видимых больших осей (см. подробности этого анализа в следующем разделе). В окончательную выборку, включающую девять кандидатов в галактики с полярными балджами, вошли лишь те объекты, у которых балдж в фильтрах g и r демонстрирует видимое сжатие $b/a < 0.9$, а разность позиционных углов больших осей дисков и балджей превышает 30° . (Точность определения параметров моделей (см. далее) не позволяет достоверно судить о принадлежности балджей с $b/a \geq 0.9$ к классу полярных.)

В табл. 1 по данным SDSS¹ и NED² суммированы основные характеристики итоговой выборки галактик, а на рис. 1 приведены их контурные карты в фильтре r . Как видно из таблицы, две галактики (первая и пятая), благодаря своей необычной морфологии, были включены ранее в каталог кандидатов в галактики с полярными кольцами (SPRC — Моисеев и др., 2011). Галактика UGC 10043 (номер 7 в табл. 1) изучалась Метьюзом и де Гризом (2004) (см. Введение).

Фотометрический анализ

Для получения фотометрических и структурных параметров исследуемых галактик мы произвели декомпозицию их изображений в фильтрах g и r в рамках двухкомпонентной модели “балдж + диск”. Изображения галактик были взяты из обзора SDSS (SDSS DR12 — см. Алам и др., 2015).

Для описания распределения поверхностной яркости в балдже использовалась модель Серсика (1963)

$$I(r) = I_{0,b} \exp \left[-\nu_n \left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (1)$$

где $I_{0,b}$, r_e и n — центральная поверхностная яркость, эффективный радиус и параметр Серсика соответственно, а ν_n — зависящая от n константа, подбираемая таким образом, чтобы в пределах r_e излучалась половина полной светимости балджа. В

¹ <http://www.sdss.org>

² <http://ned.ipac.caltech.edu>

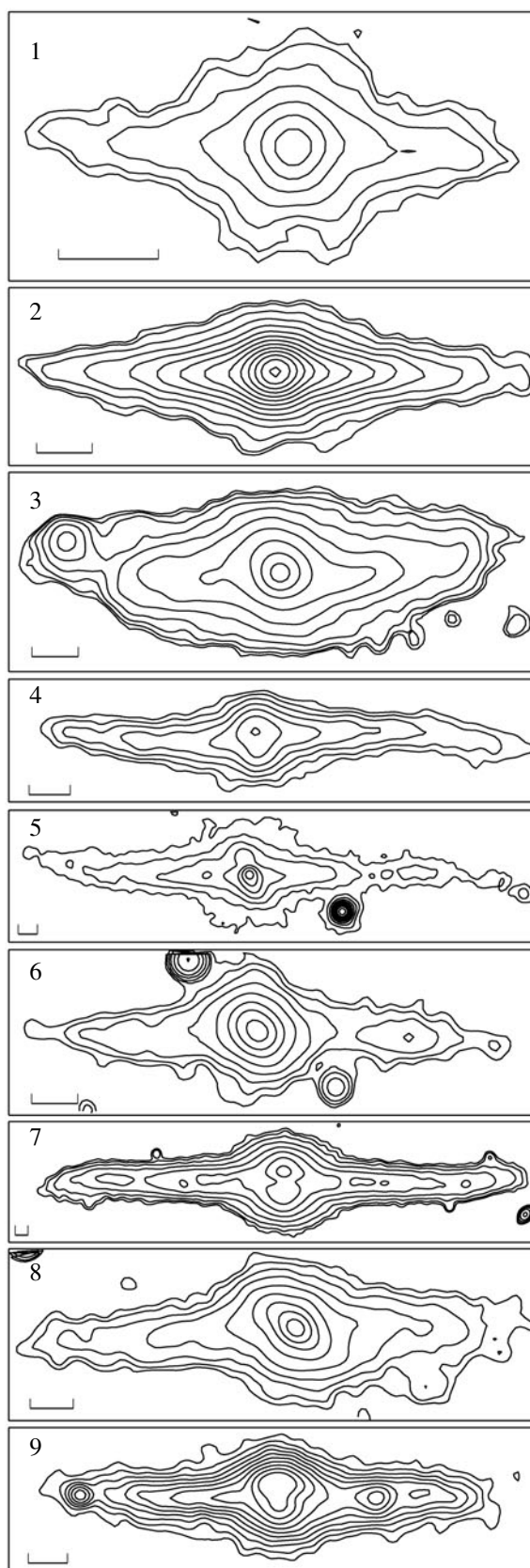


Рис. 1. Контурные карты галактик с морфологически выделенными балджами в полосе r . Значения контуров подобраны так, чтобы лучше представить глобальную структуру каждой галактики. В левом верхнем углу каждого рисунка указан номер галактики в соответствии с табл. 1. Длина отрезка в нижнем левом углу составляет 10 угл. сек.

Таблица 1. Кандидаты в галактики с полярными балджами

N	Имя галактики по SDSS	Другое имя	Тип	r (mag)	z
1	SDSS J015858.39-002923.2	SPRC-77		17.53	0.08099
2	J095346.69+351456.8			16.62	0.03928
3	J102343.67+421917.9			15.59	0.04611
4	J124331.21-142015.8	FGC 1494, RFGC 2365	Sc	16.72	
5	J133904.58+020949.5	UGC 8634, FGC 1649, RFGC 2619, SPRC-42	Sb	15.10	0.02337
6	J151223.37+013823.9			16.58	0.02850
7	J154841.10+215208.7	UGC 10043, FGC 1953, RFGC 3043	Sbc	14.34	0.00721
8	J160028.24+143201.2			15.96	0.03413
9	J222006.54+253621.0			16.96	0.04164

качестве модели диска использовалась стандартная модель видимого с ребра диска (ван дер Круит, Сирл, 1981)

$$I(r, z) = I_{0,d} \left(\frac{r}{h} \right) K_1 \left(\frac{r}{h} \right) \operatorname{sech}^2 \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (2)$$

где $I_{0,d}$, h и z_0 — центральная поверхностная яркость, радиальный и вертикальный масштабы диска, а K_1 — модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Декомпозиция, то есть поиск оптимальных значений параметров, обеспечивающих минимальную невязку между моделью и наблюдениями, проводилась по следующей схеме. На предварительном этапе происходила подготовка изображений, включающая разворот изображений так, чтобы большая ось галактики располагалась вдоль оси X изображения (для поиска позиционного угла галактики использовался метод из работы Мартина-Наварро и др., 2012), кадрирование изображений и маскирование объектов фона и пылевых полос в галактиках (если они видны). На следующем этапе первое приближение модели галактики получалось при помощи алгоритма Differential Evolution пакета Imfit (Ирвин, 2015). Преимущество данного алгоритма в том, что он не требует конкретных начальных условий для процесса оптимизации, а для его работы нужен только диапазон возможных значений параметров. Полученные таким образом параметры далее уточнялись при помощи алгоритма градиентного спуска, реализованного в пакете galfit (Пенг и др., 2010). Результат работы пакета galfit принимался в качестве итоговой модели галактики.

Так как галактики выборки имеют сравнительно небольшой угловой размер, то атмосферное размытие оказывает сильное влияние на определяемые параметры (например, Трухильо и др., 2001). Для компенсации этого эффекта производится свертка фотометрической модели с функцией PSF (point spread function), имитирующей атмосферное размытие, и с наблюдаемым изображением сравнивается уже свернутая модель. В данной работе в качестве PSF мы использовали функцию Моффата (Моффат, 1969). Параметры функции Моффата мы определяли при помощи аппроксимации изолированных звезд поля. Как правило, в поле каждой галактики находилось 10–20 таких PSF-звезд, что позволяет надежно получить параметры PSF и оценку дисперсии этих параметров.

Для оценки величины ошибок результатов декомпозиции мы провели моделирование Монте-Карло, предполагая, что основные источники ошибок — это шум изображения и несовпадение модельной PSF с реальной функцией рассеяния. Для каждой галактики была построена модель, соответствующая определенным при декомпозиции параметрам, произведена ее свертка с наблюдаемой PSF и добавлен шум, величина которого соответствует реальным параметрам. После этого была проведена декомпозиция, причем параметры PSF отличались от истинных значений по нормальному закону с величиной дисперсии, равной дисперсии параметров отдельных PSF-звезд, полученной на этапе построения PSF. Данная процедура повторялась 250 раз для каждой галактики для получения средних ошибок параметров декомпозиции.

Таблица 2. Фотометрические характеристики галактик в полосе r

N	μ_e	$r_e (")$	n	q	μ_0	$h (")$	$z_0 (")$	$\Delta P.A. (^\circ)$	M_r	$g - r$	B/T
1	22.57	2.17	6.84	0.85	22.16	4.25	0.88	73.0	-20.51	0.75	0.80
	0.33	0.32	2.40	0.04	0.10	0.17	0.06	3.6			
2	22.03	2.73	1.82	0.87	20.93	5.09	1.21	74.7	-19.85	1.02	0.36
	0.44	0.49	2.23	0.10	0.23	0.32	0.15	10.3			
3	21.46	2.17	5.44	0.69	21.22	6.37	2.77	71.3	-20.86	0.56	0.36
	0.17	0.15	0.86	0.03	0.02	0.07	0.03	1.8			
4	21.94	2.55	0.39	0.47	21.31	6.48	1.60	89.5		0.58	0.18
	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.06	0.02	0.6			
5	21.38	4.12	2.53	0.42	21.39	12.00	3.10	72.2	-20.07	0.57	0.36
	0.04	0.06	0.16	0.02	0.01	0.09	0.02	0.4			
6	20.19	1.41	1.50	0.66	22.47	8.22	2.43	49.8	-19.09	0.44	0.56
	0.13	0.07	0.08	0.02	0.06	0.37	0.29	3.2			
7	20.89	5.95	0.86	0.80	21.61	23.67	5.43	89.7	-18.75	0.64	0.44
	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.08	0.02	0.1			
8	21.40	3.04	4.13	0.42	21.88	8.28	2.97	39.1	-20.09	0.65	0.47
	0.06	0.08	0.48	0.03	0.03	0.16	0.02	0.7			
9	22.07	2.69	0.72	0.68	21.37	7.54	2.25	87.4	-20.12	0.57	0.20
	0.36	0.23	0.08	0.03	0.08	0.21	0.12	6.7			

Средняя разность интегральных звездных величин, полученных суммированием моделей для балджа и диска, и величин *modelMag*, приведенных в SDSS, составляет $-0^m37 \pm 0^m29$ в фильтре g и $-0^m23 \pm 0^m25$ в фильтре r . Если учесть, что для четырех галактик фотометрические данные в SDSS отмечены как ненадежные (unreliable), то для остальных пяти галактик согласие становится лучше: $-0^m21 \pm 0^m10$ и $-0^m10 \pm 0^m14$ в тех же фильтрах. В дальнейшем обсуждении мы будем использовать результаты нашей фотометрии.

Результаты декомпозиции галактик выборки в полосе r представлены в табл. 2. Для каждого объекта в первой строке таблицы приведено значение измеренного параметра, а во второй — ошибка измерения этого параметра, оцененная так, как это было описано ранее. В первом столбце

табл. 2 указан номер галактики в соответствии с табл. 1. В четырех следующих столбцах приведены параметры балджей: эффективная поверхностная яркость, эффективный радиус, индекс Серсика, видимое сжатие. Далее идут характеристики дисков галактик: наблюдаемая центральная поверхностная яркость, экспоненциальный масштаб, вертикальный масштаб распределения яркости. Наблюдаемая разность позиционных углов больших осей балджа и диска приведена в девятом столбце табл. 2. (Отметим, что значение $\Delta P.A.$ в таблице дает лишь усредненное по всей модели значение разности позиционных углов. На практике у ряда галактик позиционные углы больших осей дисков и балджей демонстрируют заметные вариации.) Последние три столбца дают абсолютную звездную величину галактики, ее показатель цвета и отно-

сительный вклад балджа в ее полную светимость. Значения поверхностных яркостей, абсолютных звездных величин и показателя цвета в таблице исправлены за поглощение в Галактике, согласно Шлафли и Финкбейнеру (2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие характеристики галактик

Интегральные характеристики галактик выборки в полосе r таковы: средняя абсолютная звездная величина $\langle M \rangle = -19.9 \pm 0.7$, показатель цвета $\langle g - r \rangle = +0.64 \pm 0.16$, экспоненциальный масштаб диска $\langle h \rangle = 5.1 \pm 1.0$ кпк. По всем этим характеристикам наши объекты являются типичными яркими спиральными галактиками поздних морфологических типов (см., например, Бизьев и др., 2014). Среднее значение вертикального масштаба звездного диска в полосе $r - \langle z_0 \rangle = 1.50 \pm 0.54$ кпк — также находится вблизи пика распределения галактик из каталога EGIS. Если исключить две галактики (3 и 6 по нумерации табл. 1), наклон которых по визуальному впечатлению наиболее сильно отклоняется от 90° , то это значение уменьшается до $\langle z_0 \rangle = 1.36 \pm 0.45$ кпк.

Средняя относительная толщина дисков галактик выборки составляет $\langle z_0/h \rangle = 0.285 \pm 0.07$, без галактик 3 и 6 соответствующее значение равно $\langle z_0/h \rangle = 0.265 \pm 0.06$. Эти значения близки к толщинам дисков галактик в хорошо определенных выборках видимых с ребра спиральных галактик (Мосенков и др., 2015).

Для дисков рассматриваемых галактик среднее отношение экспоненциальных масштабов в полосах g и r равно 1.09 ± 0.10 , что означает существование градиента цвета — диски галактик к периферии становятся более “голубыми”. Эта особенность типична для большинства спиральных галактик.

Интересной особенностью структуры рассматриваемых галактик является то, что примерно в половине случаев их диски демонстрируют хорошо заметные интегралообразные изгибы плоскостей (см. рис. 1). С учетом того, что изгиб легче детектировать в случае, когда его линия узлов близка к лучу зрения, можно заключить, что плоскости звездных дисков большинства галактик с полярными балджами искривлены. Сильные оптические изгибы наблюдаются у галактик относительно редко, и, как правило, их существование связывается с гравитационным взаимодействием галактик и с внешней аккрецией (Решетников, Комб, 1998, 1999; Энн, Парк, 2006).

Мы не проводили специального исследования пространственного окружения галактик выборки, однако простой анализ изображений из SDSS (для

галактики 1 из нашего списка, в частности, доступны более глубокие изображения из Stripe 82 — Абазаджан и др., 2009) показал, что у большинства объектов (у 6 из 9) наблюдаются относительно близко расположенные галактики сравнимой светимости, а также ряд более слабых спутников. К сожалению, красные смещения соседних галактик отсутствуют, так что сделать выводы об их физической связи с нашими объектами не представляется возможным.

Для ранее известных галактик с выделенными балджами есть более надежные данные. UGC 10043 (номер 7 в табл. 1) входит в состав группы и демонстрирует признаки взаимодействия с галактикой MCG+04-37-035 (Агуирре и др., 2009). Две другие галактики (NGC 4672 и NGC 4698 — см. Введение) также не находятся в изоляции. NGC 4672 входит в состав группы галактик (Гарсия, 1993), NGC 4698 является членом скопления галактик в Деве.

Фотометрические характеристики балджей

На рис. 2 показаны распределения основных характеристик выделенных балджей в полосе r . Сравнивая эти распределения с характеристиками центральных объектов галактик с полярными кольцами (рис. 2 в статье Решетникова, Комб, 2015), можно отметить, что, как и ожидалось, балджи являются, в среднем, более компактными и слабыми. Так, среднее значение абсолютной звездной величины в полосе r для балджей нашей выборки составляет $\langle M \rangle = -18.95 \pm 0.77$ (для центральных галактик ГПК оно равно -20.34), а средний эффективный радиус в той же полосе равен $\langle r_e \rangle = 1.86 \pm 0.74$ кпк (3.2 кпк для ГПК). Распределение индекса Серсика для балджей выглядит почти плоским (рис. 2b) и не показывает выраженного пика, характерного для балджей спиральных галактик ранних морфологических типов (Таска, Вайт, 2011). В целом наблюдаемое распределение близко к распределениям для балджей спиральных галактик поздних типов, однако малый объем выборки не позволяет утверждать это с уверенностью.

Средний показатель цвета выделенных балджей $\langle g - r \rangle = +0.88 \pm 0.13$ существенно “краснее” окружающих их дисков, для которых $\langle g - r \rangle = +0.49 \pm 0.22$. С учетом того, что цвета видимых почти с ребра дисков не исправлены за внутреннее поглощение, разность цветов балджей и дисков должна быть еще больше. Столь большая разность цветов балджей и дисков характерна для галактик поздних морфологических типов (Молленхофф, 2004).

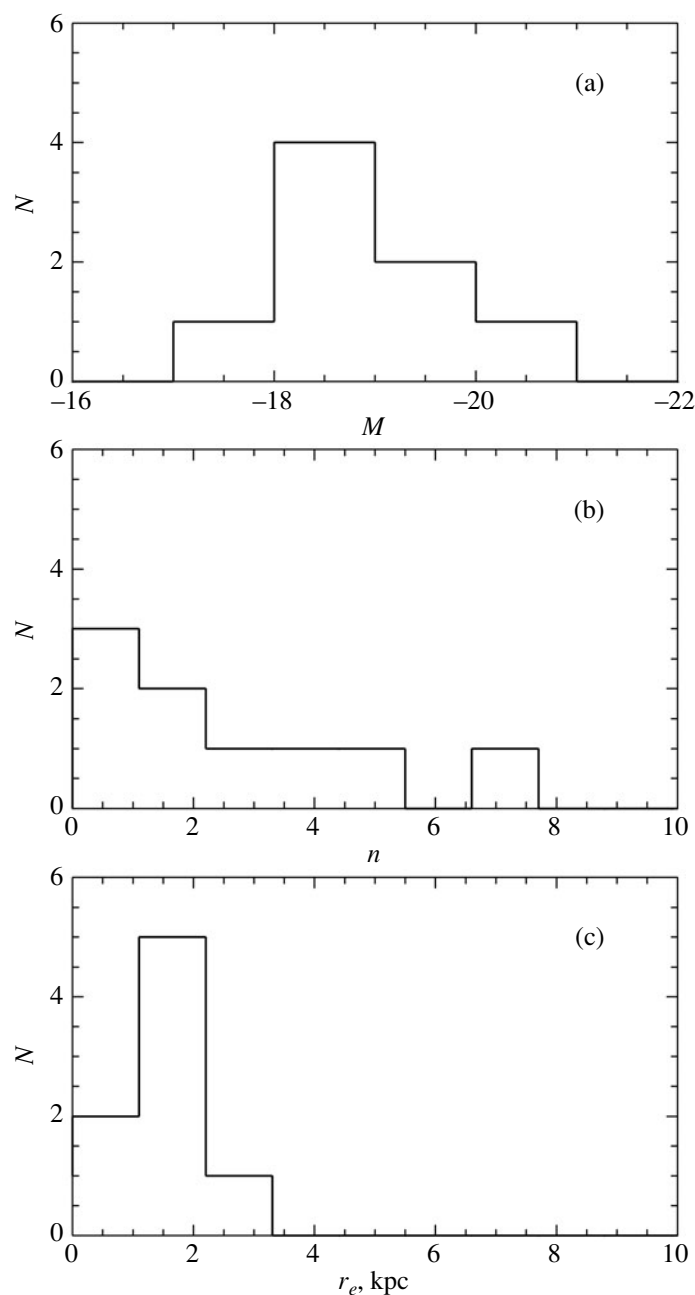


Рис. 2. Наблюдаемые распределения характеристик полярных балджей в фильтре r : абсолютная звездная величина (а), индекс Серсика (b), эффективный радиус (с).

На рис. 3 показаны фотометрические масштабные соотношения для балджей. На рис. 3а изображено соотношение между светимостью морфологически выделенного балджа и его индексом Серсика. Штриховая линия на рисунке — это средняя зависимость для балджей почти 1000 галактик по данным Гадотти (2009) (см. уравнение (25) и рис. 17 в статье Мосенкова и др., 2014). Как видно на рис. 3а, рассматриваемые нами балджи примерно следуют зависимости для нормальных галактик.

Рисунок 3b иллюстрирует соотношение светимость — размер для выделенных балджей в сравнении со средней зависимостью для балджей по данным Гадотти (2009) (уравнение (31) в работе Мосенкова и др., 2014). Полярные балджи следуют зависимости для обычных балджей, демонстрируя небольшой сдвиг в сторону больших размеров. Судить о значимости этого сдвига сложно, поскольку наша выборка мала и, кроме того, обычные балджи на плоскости светимость — размер показывают большой разброс.

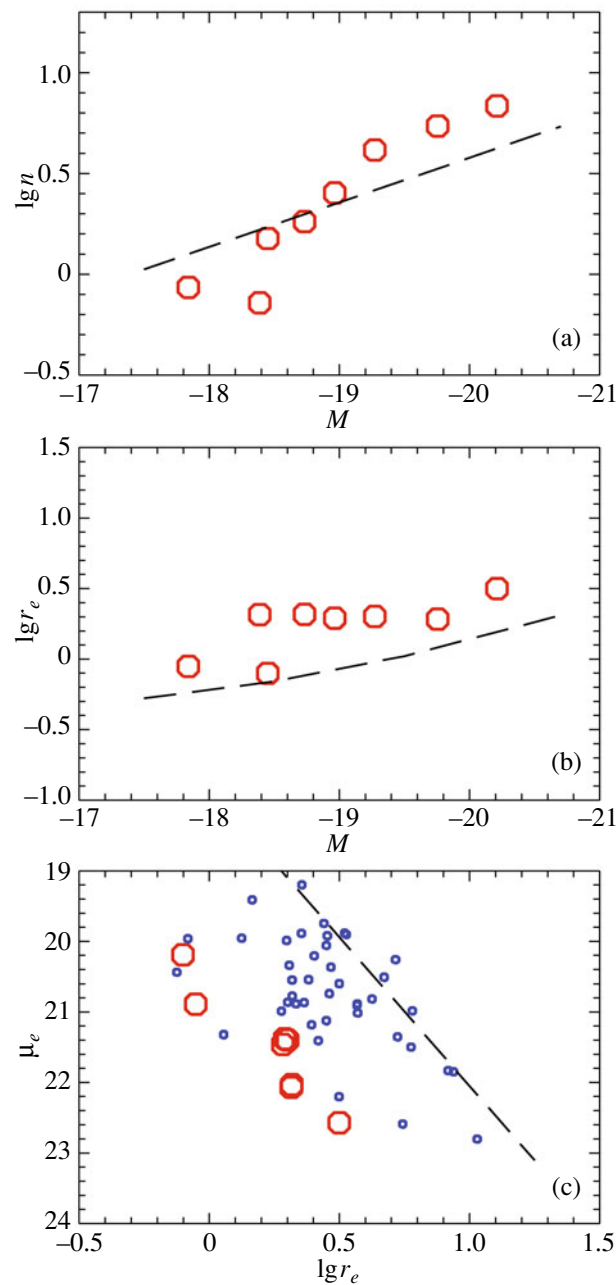


Рис. 3. Масштабные соотношения для полярных балджей в фильтре r (кружки). (а) — Зависимость светимость—индекс Серсика; штриховая линия показывает среднее соотношение для балджей нормальных галактик (см. текст). (б) — Зависимость светимость—эффективный радиус; средняя зависимость для нормальных балджей изображена штриховой линией (см. текст). (с) — Соотношение Корменди; штриховой линией показано соотношение для E/S0 галактик в скоплении Кома (Хугтон и др., 2012), точками — характеристики центральных галактик с полярными кольцами (Решетников, Комб, 2015).

Положение балджей на соотношении Корменди показано на рис. 3с. Балджи расположены на этой плоскости примерно вдоль канонического соотношения для E/S0 галактик, однако смещены от него и от центральных галактик ГПК в сторону меньших размеров и меньших поверхностных яркостей. В этой области (примерно при $\lg r_e \leq 0.5$) находятся

слабые галактики ранних типов и балджи (Капаччиоли и др., 1992). Полярные балджи находятся на краю области, где расположены ГПК, и по своим характеристикам сопоставимы с самыми слабыми и маленькими центральными объектами ГПК (рис. 3с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили выборку из девяти видимых с ребра спиральных галактик, балджи которых выделены из их дисков — большие оси балджей сильно наклонены к плоскостям дисков. (Отметим, что отбор объектов проводился на основе чисто морфологического анализа, поэтому среди наших объектов могут быть случайные проекции двух галактик.) Галактики с такими выделенными (или полярными) балджами исключительно редки. Основываясь на числе просмотренных нами галактик при поиске полярных балджей, можно сделать грубую оценку, что их относительная доля среди спиральных галактик составляет $\sim 10^{-3}$.

Анализ фотометрических характеристик дисков галактик показал, что они похожи на диски обычных спиральных галактик поздних типов (Sc—Sd). Балджи, если отвлечься от того, что они вытянуты вдоль малых осей галактик, также выглядят вполне типичными балджами. Сравнение полярных балджей с центральными галактиками ГПК показало, что они примыкают к ним и похожи на самые слабые и небольшие из них.

Особенностью галактик с полярными балджами является то, что среди них относительно часто встречаются галактики с сильными изгибами звездных дисков. Если интерпретировать изгиб как следствие внешнего возмущения и внешней аккреции, то, возможно, и формирование полярных балджей также обусловлено этими причинами. Как было отмечено во Введении, в двух из трех ранее известных полярных балджах наблюдаются кинематически выделенные подсистемы, вращающиеся почти ортогонально дискам галактик. Существование таких подсистем обычно связывается с внешней аккрецией вещества. Следовательно, обнаружение подобных кинематически-выделенных структур в полярных балджах других галактик дало бы хороший аргумент в пользу гипотезы об образовании выделенных балджей при внешней аккреции.

Однако вопрос о том, что же является вторичной структурой у галактик с полярными балджами — диски или балджи, остается неясным. Их сходство с ГПК, у которых формирование полярных дисков/колец хорошо воспроизводится в моделях с внешней аккрецией вещества из другой галактики или из облака межгалактического газа (Решетников, Сотникова, 1997; Бурно, Комб, 2003; Маччио и др., 2006), возможно, предполагает, что именно диски в таких объектах являются вторичными. С этой точки зрения галактики с полярными балджами являются просто ГПК со слабыми центральными галактиками. С другой стороны, как обсуждалось Метьюз и де Гризом (2004), возможен и противоположный сценарий, при котором ранее существовавшая дисковая галактика захватывает

в околополярной плоскости небольшую эллиптическую галактику, ставшую ее балджем. Вероятно, можно предложить и менее экзотические сценарии, однако ясно, что для выяснения природы этих уникальных объектов необходимы новые наблюдательные данные и реалистичное численное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-02-810 и 13-02-00416).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абазаджан и др. (K.N. Abazajian, J.K. Adelman-McCarthy, M.A. Agueros, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **182**, 543 (2015).
2. Агуйппе и др. (P. Aguirre, J.M. Uson, and L.D. Matthews), *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* **35**, 201 (2009).
3. Алам и др. (S. Alam, F.D. Albareti, C.A. Prieto, F. Anders, F.S. Anderson, T. Anderton, B.H. Andrews, E. Armengaut, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 12A (2015).
4. Атанасоула (E. Athanassoula), *MNRAS* **358**, 1477 (2005).
5. Бекки (K. Bekki), *Astrophys. J.* **499**, 635 (1998).
6. Бертола и др. (F. Bertola, E. M. Corsini, J. C. Vega Beltran, A. Pizzella, M. Sarzi, M. Cappellari, and S. J. Funes), *Astrophys. J.* **519**, L127 (1999).
7. Бизяев и др. (D.V. Bizyaev, S.J. Kautsch, A.V. Mosenkov, V.P. Reshetnikov, N.Ya. Sotnikova, N.V. Yablokova, and R.W. Hillyer), *Astrophys. J.* **787**, id.24 (2014).
8. Бурно, Комб (F. Bournaud and F. Combes), *Astron. Astrophys.* **401**, 817 (2003).
9. ван дер Круит, Сирл (P.C. van der Kruit and L. Searl), *Astron. Astrophys.* **95**, 105 (1981).
10. Гадотти (D.A. Gadotti), *MNRAS* **393**, 1531 (2009).
11. Гарсия (A.M. Garcia), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **100**, 47 (1993).
12. Ирвин (P. Erwin), *Astrophys. J.* **799**, id. 226 (2015).
13. Капаччиоли и др. (M. Capaccioli, N. Caon, and M. D'Onofrio), *MNRAS* **259**, 323 (1992).
14. Корменди (J. Kormendy), *Galactic Bulges* (Ed. E. Laurikainen, R.F. Peletier, D.A. Gadotti, New York: Springer, 2015).
15. Корменди, Кенникатт (J. Kormendy and R.C. Kennicutt), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).
16. Корсини и др. (E.M. Corsini, J. Méndez-Abreu, N. Pastorello, E. Dalla Bonta, L. Morelli, A. Beifiori, A. Pizzella, and F. Bertola), *MNRAS* **423**, L79 (2012).
17. Мартин-Наварро и др. (I. Martin-Navarro, J. Bakos, I. Trujillo, J.H. Knapen, E. Athanasoula, A. Bosma, S. Comeron, B.G. Elmegreen, et. al.), *MNRAS* **427**, 1102 (2012).
18. Маччио и др. (A.V. Maccio, B. Moore, and J. Stadel), *Astrophys. J.* **636**, L25 (2006).
19. Мендес-Абрю (J. Méndez-Abreu), *Galactic Bulges* (Ed. E. Laurikainen, R.F. Peletier, D.A. Gadotti, New York: Springer, 2015).

20. Метьюз, де Гриз (L.D. Matthews and R. de Grijs), *Astron. J.* **128**, 137 (2004).
21. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, K.I. Smirnova, A.A. Smirnova, and V.P. Reshetnikov), *MNRAS* **418**, 244 (2011).
22. Молленхофф (C. Mollenhoff), *Astron. Astrophys.* **415**, 63 (2004).
23. Мосенков и др. (A.V. Mosenkov, N.Ya. Sotnikova, and V.P. Reshetnikov), *MNRAS* **441**, 1066 (2014).
24. Мосенков и др. (A.V. Mosenkov, N.Ya. Sotnikova, V.P. Reshetnikov, D.V. Bizyaev, and S.J. Kautsch), *MNRAS* **451**, 2376 (2015).
25. Моффат (A.F.J. Moffat), *Astron. Astrophys.* **3**, 455 (1969).
26. Пенг и др. (Ch.Y. Peng, L.C. Ho, Ch.D. Impey, and H.-W. Rix), *Astron. J.* **139**, 2097 (2010).
27. Рензини (A. Renzini), *The Formation of Galactic Bulges* (Ed. C.M. Carollo, H.C. Ferguson, R.F.G. Wyse, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999).
28. Решетников, Сотникова (V. Reshetnikov and N. Sotnikova), *Astron. Astrophys.* **325**, 933 (1997).
29. Решетников, Комб (V. Reshetnikov and F. Combes), *Astron. Astrophys.* **337**, 9 (1998).
30. Решетников, Комб (V. Reshetnikov and F. Combes), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 101 (1999).
31. Решетников, Комб (V. Reshetnikov and F. Combes), *MNRAS* **447**, 2287 (2015).
32. Сарзи и др. (M. Sarzi, E.M. Corsini, A. Pizzella, J.C. Vega Beltran, M. Cappellari, J.G. Funes, and F. Bertola), *Astron. Astrophys.* **360**, 439 (2000).
33. Серсик (J.L. Sersic), *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia* **6**, 41 (1963).
34. Таска, Вайт (L.A.M. Tasca and S.D.M. White), *Astron. Astrophys.* **530**, A106 (2011).
35. Трухильо и др. (I. Trujillo, J.A.L. Aguerri, J. Cepa, and C.M. Gutiérrez), *MNRAS* **328**, 977 (2001).
36. Хугтон и др. (R.C.W. Houghton, R.L. Davies, E. Dalla Bonita, and R. Masters), *MNRAS* **423**, 256 (2012).
37. Шлафли, Финкбейнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, id.103 (2011).
38. Энн, Парк (H.B. Ann and J.-C. Park), *New Astron.* **11**, 293 (2006).
39. Эпплтон, Страк-Марсел (P.N. Appleton and C. Struck-Marcell), *Fund. Cosm. Phys.* **16**, 111 (1996).
40. Эрвин и др. (P. Erwin, R.P. Saglia, M. Fabricius, J. Thomas, N. Nowak, S. Rusli, R. Bender, J.C. Vega Beltran, and J.E. Beckman), *MNRAS* **446**, 4039 (2015).